

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení**

**Určení odporu porézního prostředí**  
**Determination of the Porous Medium Resistance**

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Viktor Polášek  
Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání bakalářské práce

Student: **Viktor Polášek**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**  
Téma: **Určení odporu porézního prostředí**  
**Determination of the Porous Medium Resistance**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k tématu porézní prostředí (definice porézního prostředí, pórovitost, permeabilita prostředí, tlaková ztráta porézního prostředí).
2. Zpracování problematiky měření porézního prostředí. Návrh experimentální trati k měření parametrů různého druhu porézního prostředí.
3. Návrh postupu měření, výběr měřidel.
4. Praktické měření na experimentální trati, vyhodnocení měřených veličin, stanovení permeability a pórovitosti porézního prostředí.
5. Vytvoření návodu k praktickému měření porézního prostředí na sestavené experimentální trati.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MIKAN, J.: *Měření plynů*. Praha: Říčany u Prahy, 2003. 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
2. NOSKIEVIČ, J.: *Mechanika tekutin*, Praha SNTL, 1987, 354s.
3. NOŽIČKA, J.: *Mechanika tekutin*, Vydavatelství ČVUT, 2004, 165s.
4. BEAR, J.: *Dynamics of fluids in porous media*. Israel: Dover Publications (September 1, 1988), 1988. Stránky 12-15. ISBN-13: 978-0486656755.
5. HRÁDEK, F.: *Hydrologie*, Česká zemědělská univerzita, Praha, 2004, 271s.
6. KEMEL, M.: *Hydrologie*, České vysoké učení technické, Praha, 1985, 292s.
7. NOSKIEVIČ, J.; JANALÍK, J.; RÝC, Z.; ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin příručka pro laboratorní cvičení*. Ostrava. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1987. 152s. ISBN 80-03-00308-3.
8. VINOPAL, S.; KOLÁŘ, V.: *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha. SNTL Praha. 1963. 650 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jaroslav Krutil

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



---

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
vedoucí katedry



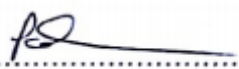
---

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....16.5.2012.....

..........

podpis studenta

## PROHLÁŠENÍ O VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE

Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

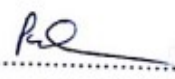
Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě... 16. 5. 2012

  
.....  
podpis studenta

## **ANOTACE**

POLÁŠEK, V. Určení odporu porézního prostředí. Ostrava: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012, 48 s. Bakalářská práce, vedoucí Bojko, M.

Tato bakalářská práce se zabývá určením a měřením odporu porézního prostředí, které bylo realizováno na vzduchové trati. V úvodu teoretické části je charakterizována struktura porézního prostředí. Dále je definován pojem pórovitost a metody měření a stanovení pórovitosti včetně možného přístrojového vybavení ke stanovení pórovitosti. Na základě poznatků o porézním prostředí byla navržena experimentální měřicí trať, na které bylo realizováno měření. Na vzduchové trati byla měřena tlaková difference porézního prostředí a průtočné množství. Porézní prostředí představuje válec naplněný kuličkami různých průměrů. Výsledky všech měření jsou vyhodnoceny pomocí tabulek a grafických závislostí. V závěru jsou všechny měření odporu prostředí porovnávány.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

POLÁŠEK, V. Determination of the Porous Medium Resistance.

Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2012, 48 p.

Thesis, head: Bojko, M.

This Bachelor Thesis is concerned with defining and measuring the resistance of a porous medium, which was realized on an air line. At the beginning, the terms porous medium and porosity are explained. The next terms are porosity and methods of their measuring and setting porosity, including instrumental equipment. Based on the information about the porous medium, an experimental measurement line was designed, which was used for real measuring. On the air line were measured pressure difference of porous medium and flow quantity. Porous medium represents cylinder filled with balls of various diameters. All the achieved figures are evaluated according to the tables and the graphical dependencies. At the end, all the results of measuring the porous medium resistance are compared.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Charakteristika a struktura porézního prostředí .....</b>	<b>10</b>
2.1	Klasifikace a charakteristika tvaru a rozměru pórů .....	12
2.2	Základní definice pórovitosti.....	15
2.3	Metody měření a stanovení pórovitosti, druhy pórovitosti .....	16
2.3.1	Koeficient filtrace .....	17
2.3.2	Rtuťová porozimetrie.....	18
2.3.3	Přístroje na měření pórovitosti .....	20
2.3.4	Stanovení nasákavosti.....	21
2.4	Tlaková ztráta definována v porézním prostředí .....	22
2.5	Odpor prostředí.....	23
<b>3</b>	<b>Návrh experimentální měřicí tratě .....</b>	<b>25</b>
3.1	Varianta měření porézního prostředí na experimentální měřicí trati s jedním ventilátorem.....	26
3.2	Postup měření varianty s jedním ventilátorem.....	27
3.3	Varianta měření porézního prostředí na experimentální měřicí trati se dvěma ventilátory.....	28
3.4	Postup měření varianty se dvěma ventilátory .....	30
<b>4</b>	<b>Specifikace prvků a měřidel.....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>Základní vztahy k vyhodnocování měření .....</b>	<b>33</b>
5.1	Obecný postup výpočtu.....	33
5.2	Vyhodnocení měření pro variantu s jedním ventilátorem.....	34
<b>6</b>	<b>Návod cvičení pro měření odporu porézního prostředí.....</b>	<b>38</b>
6.1	Zadání měření.....	38
6.2	Schéma měřicí tratě .....	38
6.3	Specifikace prvků .....	40
6.4	Postup měření .....	40
6.5	Zpracování naměřených a vypočtených hodnot .....	40
6.6	Tabulka naměřených a vypočtených hodnot.....	42
6.7	Příklad výpočtu.....	43
6.8	Graf.....	44
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použitých pramenů a literatury .....</b>	<b>47</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ

Označení	Význam	Jednotka
$p$	tlak	Pa
$p$	pórovitost	1
$p_m$	pórovitost z měřeného vzorku	1
$\Delta p$	tlaková ztráta	Pa
$\Theta$	úhel smáčení	°
$F$	odporová síla	N
$D, C$	předepsané matice	1
$d$	průměr	m
$d_p$	velikost póru porézního média	m
$p_s$	skutečná pórovitost	%
$p_u$	uzavřená pórovitost	%
$p_z$	zdánlivá pórovitost	%
$NV$	nasákavost	%
$\rho_1$	objemová hmotnost zeminy	kg.m <sup>-3</sup>
$\rho_2$	měrná hmotnost zeminy	kg.m <sup>-3</sup>
$\rho$	hustota	kg.m <sup>-3</sup>
$m_s$	hmotnost suchého (vysušeného) vzorku	kg
$m_n$	hmotnost vzorku po zkoušce nasákavosti	kg
$V_1$	objem válce	m <sup>3</sup>
$V_2$	celkový objem kuliček	m <sup>3</sup>
$v_s$	střední rychlost	m.s
$v_j$	rychlost proudění	m.s
$g$	tíhové zrychlení	m.s <sup>-2</sup>
$h$	výška sloupce rtuti v póru	m
$Q_v$	objemový průtok	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
$S$	průtočný průřez	m <sup>2</sup>
$t$	tloušťka porézního prostředí	m
$C_2$	vnitřní odporový součinitel	m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup>
$Re$	Reynoldsovo číslo	1
$Re_d$	Reynoldsovo číslo pro porézní prostředí	1
$r$	poloměr póru kruhového průřezu	m
$\mu$	kinematická viskozita vzduchu	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$\mu$	zaplnění	1
$\alpha$	permeabilita prostředí	m
$\nu$	kinematická viskozita	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$\gamma$	povrchové napětí	N.m <sup>-1</sup>
$W_p$	rychlost kapaliny	m.s <sup>-1</sup>
$W_f$	filtrační rychlost	m.s <sup>-1</sup>
$\zeta_d$	koeficient hydraulického odporu	1
$l$	charakteristický rozměr tělesa	m
$\eta$	dynamická viskozita	Pa.s
$k$	konstanta úměrnosti	1
$k$	koeficient filtrace	m.s <sup>-1</sup>
$n$	pórovitost	1
$K_r$	relativní koeficient filtrace	1
$K_{sat}$	matice hydraulické vodivosti	1
$\nabla h$	hydraulický gradient	1



# 1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá studiem porézního prostředí, porézních látek a pórovitostí. Jsou definovány základní parametry a charakteristiky porézního prostředí. Dále jsou popsány metody měření a měřicí přístroje ke stanovení pórovitosti. Na základě všech těchto poznatků o porézním prostředí byla navržena vzduchová trať, na které se měřila tlaková ztráta a objemový průtok definovaného porézního prostředí.

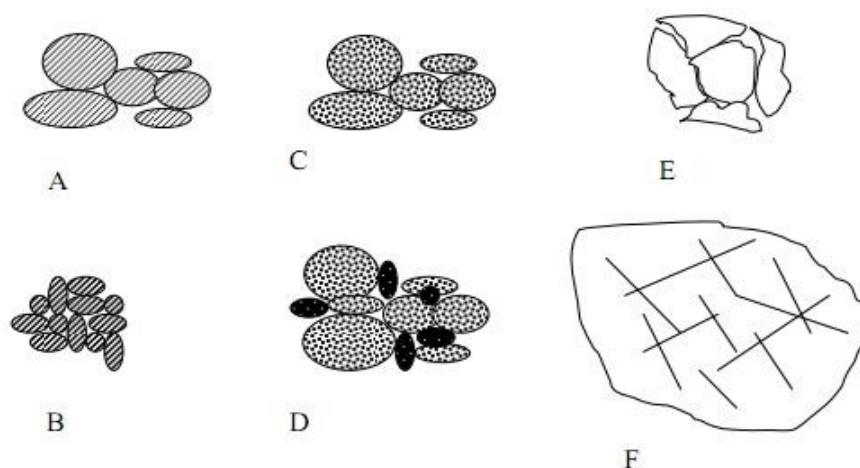
Studium určení odporu porézního prostředí má velký význam ve všech možných odvětvích jak ve vědě, tak v průmyslu, jelikož se s touto problematikou velmi často setkáváme. Porézní látky se vyskytují v řadě oblastí; například v chemii a chemické technologii, kde jde nejčastěji o porézní katalyzátory, absorbenty, separační membrány, tabletové léky, některé polymery (pěnový polystyren) aj. Porézní materiály jsou však běžné i ve stavebnictví (cihly, omítky aj.), v geologii (pískovce, opuky) stejně jako v papírenském průmyslu (papír, lepenky) nebo v kožedělství. Široké využití porézních látek vyžaduje podrobnou znalost veškerých údajů o médiu. Pod porézním prostředím si můžeme představit půdy, porézní nebo rozpukané skály, keramiku, papír, pískové filtry, porézní katalyzátory, délkové a plošné textilie, děrované plechy atd. V hydraulice a pneumatice jsou nejčastějšími prvky porézního prostředí filtry, které jsou součástí většiny obvodů. Všechny tyto látky mají svoji strukturu. Uspořádání je mnohdy náhodné, a proto vznikají prázdná místa tzv. póry. Dále póry propojují průchozími cestami porézní těleso z jedné strany na druhou a tyto průchozí cesty jsou rozděleny v porézním médiu buď pravidelně, nebo náhodně. Ačkoli je takto popsán přijatelný model porézního média, popis postrádá možnost výměny tekutiny mezi přiléhajícími cestami (póry) a také prostorový pohyb tekutiny všemi směry uvnitř porézního média.

Ve své bakalářské práci jsem provedl návrh experimentální měřicí trati, na které je měřen odpor porézního prostředí. Sestaveno bylo několik variant měření, které obsahovaly válec vyplněný kuličkami různých průměrů. Tento válec jsem vložil do vzduchové trati, kde zdrojem průtoku vzduchu je ventilátor. Porézní prostředí ve válci (délek  $l=19,7\text{mm}$  a  $l=9\text{mm}$ ) je tvořeno kuličkami o průměru  $d=3\text{mm}$  a  $d=6\text{mm}$ . Měřením je vyhodnocena tlaková ztráta ( $\Delta p$ ) na porézním prostředí a průtočné množství vzduchu ( $Q_v$ ) procházející porézním prostředím. Z těchto naměřených hodnot je stanovena střední rychlost proudícího vzduchu ( $v_s$ ), Reynoldsovo číslo ( $Re$ ), vnitřní odporový součinitel ( $C_c$ ) porézního prostředí, pórovitost porézního prostředí ( $p$ ) a

permeabilita ( $\alpha$ ). Pórovitost porézního prostředí je stanovena ze dvou různých přístupů a tyto výsledky jsou následně porovnávány. Závislosti tlakové ztráty na střední rychlosti proudění jsou vykresleny do grafů. Práce také obsahuje návod ke cvičení pro měření odporu porézního prostředí.

## 2 CHARAKTERISTIKA A STRUKTURA PORÉZNÍHO PROSTŘEDÍ

Cílem hodnocení charakteristik porézních materiálů je daný materiál zařadit, klasifikovat, popsat a modelovat. Následně popsat dutiny existující v pevné matici, označované jako póry. Systémy klasifikace pórů v literatuře se často liší dle autora, adsorbované látky či typu porézního média. Například obr. 2.1 ukazuje různé typy porézních hornin.



Obr. 2.1 Typy mezer ve skalních útvech[3]

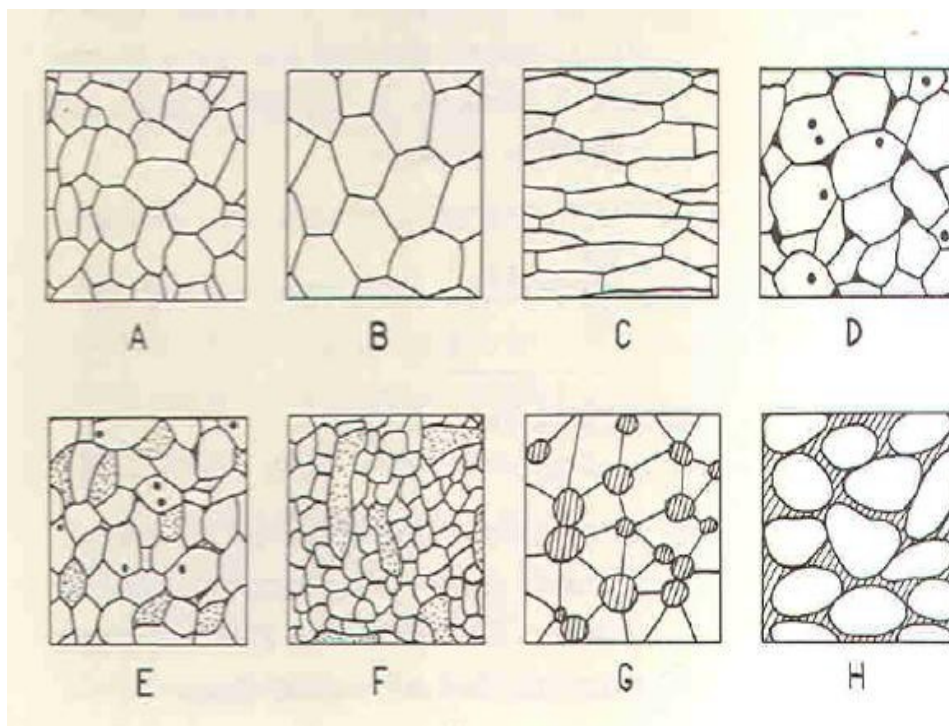
- Obr. 2.1 - A. ložisko o velké porózitě;  
 B. ložisko o malé porózitě;  
 C. ložisko z porézních materiálů;  
 D. ložisko se sedimentem;  
 E. póry vzniklé rozpuštěním;  
 F. póry vzniklé zlomem.

Velmi často však musíme chování těchto látek předpovídat. Složitost porézní struktury a nahodilost uspořádání pórů vylučuje exaktní řešení úloh v přesně popsanych geometriích. A to zejména fyzikální zákony a rovnice popisující model porézního

prostředí v souladu se zachováním hybnosti, energie a všech ostatních skalárních veličin.

Podle úrovně sledování rozlišujeme texturu a strukturu materiálu. Textura popisuje vzájemné prostorové uspořádání částic a pórů na makroskopické úrovni (od 0,1mm). Struktura charakterizuje druh a skladbu jednotlivých fází látek bez ohledu na prostorové uspořádání na makroskopické úrovni. Na obr. 2.2 můžeme vidět několik typů mikrostruktur:

- A. Polykrystalická s různě velkými zrny
- B. Polykrystalická s prakticky stejně velkými zrny
- C. Polykrystalická s orientovanými zrny (mikrostruktura)
- D. Mikrostruktura s malými póry (póry mezi zrny zabarveny a póry v samotném zrně)
- E. Mikrostruktura s póry velikosti zrna (póry vyšrafované a póry v samotném zrně)
- F. Mikrostruktura s velkými póry
- G. Mikrostruktura o dvou fázích, přičemž krystalická nemá přímou vazbu
- H. Mikrostruktura o dvou fázích, krystalické a skelné (čárkovaná)



Obr. 2.2 Idealizované mikrostruktury[9]

Struktura látek je určena základními geometrickými charakteristikami, a to objemem, rozměrem, distribucí a tvarem pórů a měrným povrchem. Tvar pórů může být otevřený, otevřený spojitý (beton, cihly, pórobeton) a uzavřený (nenasákavé, slinutý keramický střep, polystyren). Pronikání kapaliny do otevřených pórů různé velikosti lze vypočítat dle rovnice 2.1.

$$r = \frac{2\gamma}{p \cdot \cos \Theta} \Rightarrow r_{Hg} = \frac{1,227}{p} \Rightarrow r_{H_2O} = \frac{0,146}{p} \quad (2.1)$$

Kde

$r$	-	<i>poloměr póru kruhového průřezu</i>
$p$	-	<i>tlak kapaliny [Pa]</i>
$\Theta$	-	<i>úhel smáčení [°], voda 0°, rtuť 140°,</i>
$\gamma$	-	<i>povrchové napětí [Nm<sup>-1</sup>], voda 0,073 Nm<sup>-1</sup>, rtuť 0,47 Nm<sup>-1</sup>.</i>

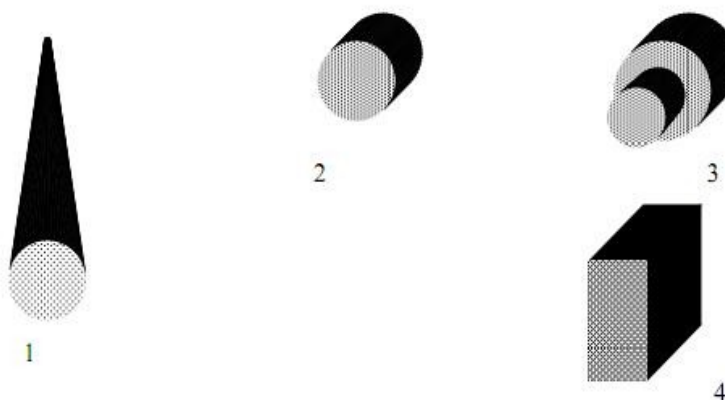
Úhel smáčení je úhel, který svírá tečna k povrchu kapky, vedená v bodě styku kapky s rozhraním - hlavní charakteristika tvaru kapky kapaliny umístěné na povrchu nerozpustné tuhé látky.

Póry nejsou jednoduché kapiláry, ale jejich tvar je složitý a proměnlivý. Proto se pórovitost materiálu popisuje pomocí distribuce pórů, což je funkce stanovující velikost a rozdělení pórů. Pro její určení se používají různé metody, např. elektronová či optická mikroskopie, nasávání či vytěšňování kapalin. Pórovitost popisuje také měrný povrch, který se může stanovit provzdušňovací metodou nebo adsorpcí dusíku. [1][6][9][12]

## 2.1 Klasifikace a charakteristika tvaru a rozměru pórů

Tvar pórů porézní látky je nepříliš dobře definovaný pojem. Jelikož jsou póry velmi malé, existuje jediná možnost jejich přímého pozorování, kterou je elektronová mikroskopie. Nevýhodou tohoto typu pozorování je, že čím větší zvětšení elektronový mikroskop má, tím menší plochu s ním pozorujeme. Prozkoumání větší plochy pak vyžaduje neúměrně vysoký počet snímků, což je velmi nepraktické. Další nevýhodou je, že ač zkoumáme prvek třírozměrný, mikroskopie poskytuje pouze obraz dvourozměrný. Samozřejmě póry nejsou ve strukturách nikdy určitého tvaru, proto se zavádí tvarové zjednodušení.

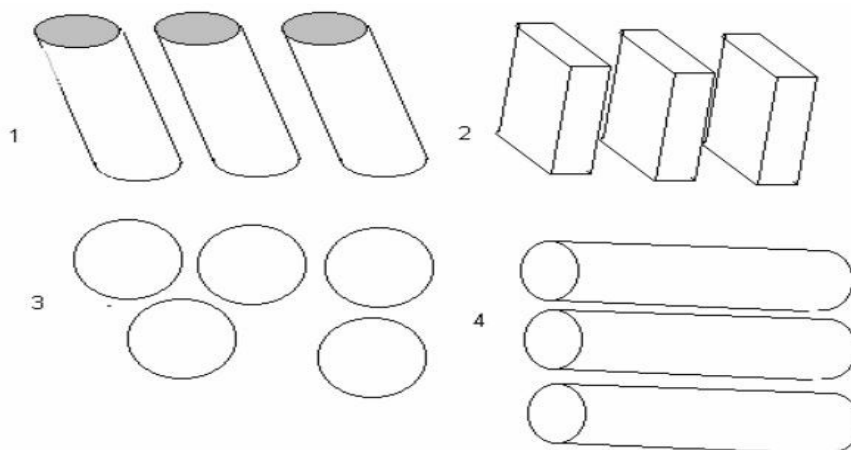
Obr. 2.3 ukazuje zjednodušené a schematické podání tvarů pórů ve skutečných strukturách. Póry se od sebe navzájem liší tvarem i rozměrem. Tyto tvary jsou zpravidla složité a obtížně popsitelné – proto se zjednodušují vhodnými modely. Nejčastějšími modely jsou: válec, destička (štěrbina), kužel a inkoustová lahvička.



Obr. 2.3 Tvary pórů [12]

*Obr. 2. 3 - 1 kuželovitý; 2 válcový; 3 tvar inkoustové lahvičky; 4 deskovitý.*

Existuje však celá řada typů modelových pórů s nejrůznějšími velikostmi. Jedny z jednodušších variant jsou uvedeny na obr. 2.4. Velmi záleží na způsobu přípravy porézní látky. Jako příklad lze uvést situaci, kdy se do tvaru tablet vylisuje jemný neporézní prášek. Neporézní primární částice prášku budou vlivem povrchových sil lnout k sobě a vytvářet tím agregáty (sekundární částice). Mezery mezi primárními částicemi a mezery mezi sekundárními částicemi vytvářejí porézní systém, ve kterém jednotlivé mezery (póry) budou co do tvaru a velikosti asi podobné tvaru a velikosti primárních a sekundárních částic. Proces lisování způsobuje, že částice se ukládají těsněji k sobě a že dochází k rozpadání některých sekundárních částic, případně i k drcení primárních částic. Současně se mohou vytvářet jiné sekundární částice s odlišným rozměrem, případně i tvarem. Pokud primární částice jsou samy o sobě porézní, přibudou v porézní struktuře ještě i (mikro) póry primárních částic. Zcela odlišná však bude situace, když příprava katalyzátoru bude založena na vyluhování jedné složky kompaktní tuhé látky (Raneyův nikl, porézní sklo aj.). Přestože skutečný rozměr pórů nelze jednoznačně definovat, používá se tento pojem zcela běžně u modelových pórů. Jsou-li modelové póry tvořeny štěrbinami mezi destičkovými tuhými částicemi, rozumí se rozměrem póru šířka štěrbin, u válcových pórů jejich průměr atd.[6]



Obr. 2.4 Idealizované typy porézních struktur [6]

*Obr. 2.4 – neprotínající se válcové kapiláry; 2 – stejně vzdálené kompaktní destičky (póry jsou mezery mezi destičkami); 3 – kompaktní kulové částice stejné velikosti (póry jsou mezery mezi koulemi); 4 – stejně velké kompaktní válečky (póry jsou mezery mezi válečky)*

Základem klasifikace pórů podle rozměru je skutečnost, že některé fyzikální procesy probíhají v pórech různého rozměru odlišným mechanismem. Běžně se používá Dubininova klasifikace vyplývající z odlišnosti průběhu fyzikální adsorpce plynů (např. dusík, argon, krypton aj.) v porézních látkách.

Podle Dubinina rozlišujeme:

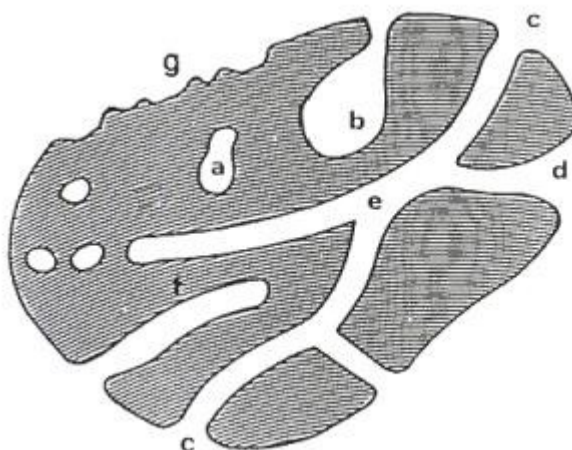
- I. mikropóry rozměr menší než 2 nm
- J. mesopory rozměr mezi 2 nm a 50 nm
- K. makropóry rozměr větší než 50 nm

U mikropórů se ještě někdy rozlišují ultramikropóry (nejužší póry) a supermikropóry (rozměr blíže k hranici s mesopóry).[6]

Klasifikace pórů		
Ultramikropóry	- Mikropóry	< 2 nm
Supermikropóry		
	Mesopóry	2 – 50 nm
	Makropóry	> 50 nm

Obr. 2.5 Klasifikace pórů [6]

Póry můžeme třídit i podle dostupnosti vzhledem k okolí. Jestliže póry komunikují s okolím, mluvíme o pórech otevřených. Naopak póry, které styk s okolím nemají, jsou póry uzavřené. Existují i póry, které jsou otevřené jen na jedné straně (póry slepé), nebo otevřené na obou koncích. Póry uzavřené neovlivňují přímo adsorpci a průnik molekul, ale ovlivňují mechanické vlastnosti pevných matric. Roztřídění pórů vzhledem k jejich dostupnosti je možné vidět na obr. 2.6.[7]



Obr. 2.6 Schematické roztřídění pórů vzhledem k jejich dostupnosti [7]

*Obr. 2.6 - a- uzavřený pór; b, f - póry zavřené pouze na jednom konci; c, d, g – otevřené póry; e - póry otevřené na obou koncích, průběžně.*

## 2.2 Základní definice pórovitosti

Pórovitost je vlastnost těles, jejichž prostor není hmotou zcela vyplněn. Mezi částicemi látky jsou větší nebo menší mezery, tzv. póry, jimiž můžou kapaliny proniknout. Čím je pórů více, tím větší množství kapaliny nebo vzdušiny může látka pojmout. Velikost dutin rozhoduje o podmínkách pohybu. Ve velkých pórech a dutinách se děje pohyb účinkem gravitačních sil, v malých dochází k velmi pomalému pohybu vlivem sil kapilárních. Podle toho dělíme póry na kapilární a nekapilární. Pokud jsou póry velké, může vzniknout pohyb turbulentní, v malých dochází k pohybu laminárnímu. Látka se považuje za nasycenou, jestliže všechny póry jsou zaplněny vodou.

Pórovitost je míra prázdných prostorů v materiálu a je změřena jako zlomek mezi 0 – 1, nebo jako procento mezi 0 – 100 %. Použitý v geologii, hydrogeology, pedologii a vědě stavby, pórovitost porézního média (takový jako skála nebo usazenina) popisuje zlomek prázdného prostoru v materiálu, kde prázdný prostor je vzduch nebo voda. Nejčastěji se pórovitost materiálu pohybuje v mezích 26-48%, v průměru je rovna cca 37%. Poněvadž prostory mezi většími zrny jsou vyplňovány zrny menších velikostí, je pórovitost zpravidla menší.[1]

Pro jednoznačnou charakteristiku, jak velkou část objemu porézního vzorku tvoří póry a jakou část plná místa, jsou zavedeny pojmy pórovitost a zaplnění. Pórovitost je vyjádřena jako podíl objemu pórů k celkovému objemu vzorku dle rovnice 2.2.

$$p = \frac{V_P}{V_C} \quad p \in \langle 0,1 \rangle \quad [1] \quad (2.2)$$

nebo

$$p = \frac{V_P}{V_C} \cdot 100 \quad p \in \langle 1,100 \rangle \quad [\%] \quad (2.3)$$

Doplňkem k porózitě je pak zaplnění. Zaplněním  $\mu$  charakterizujeme zaplněný prostor dle rovnice 2.4.

$$p = 1 - \mu \quad [1] \quad (2.4)$$

## 2.3 Metody měření a stanovení pórovitosti, druhy pórovitosti

Další ze způsobů definice pórovitosti můžeme najít např. v hydrologii, která se však dá vztáhnout i na jiné látky, jelikož princip je stále stejný. Vychází se z předpokladu nasycení zemin. Zemina se považuje za nasycenou, jestliže všechny póry jsou zaplněny vodou. Určíme množství vody, které zaplní všechny póry. Podíl tohoto objemu vody a objemu suchého vzorku dává pórovitost vyjádřenou jako relativní číslo, menší než jedné. V laboratorních podmínkách pórovitost určíme podle výrazu:[1]



$$p = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

Kde  $\rho_1$  - objemová hmotnost zeminy  
 $\rho_2$  - měrná hmotnost zeminy

Výše definovaná pórovitost představuje skutečnou pórovitost. Dále je možné definovat zdánlivou pórovitost  $p_z$  a uzavřenou pórovitost  $p_u$ . Mezi jednotlivými pórovitostmi platí vztah  $p = p_z + p_u$ . Stanovení zdánlivé a uzavřené pórovitosti je uvedeno v literatuře.[13]

Na pórovitosti má zásadní vliv uspořádání jednotlivých zrn mezi sebou. Za předpokladu kulových zrn stejné velikosti a jejich uspořádání do krychle je pórovitost rovna:[9]

$$p = \frac{d^3 - \frac{\pi \cdot d^3}{6}}{d^3} \quad [1] \quad (2.6)$$

### 2.3.1 Koeficient filtrace

Pórovitost je nepřímo příbuzná koeficientu filtrace. Je to schopnost pórovitého prostředí (tj. zemin a hornin) propouštět kapalinu o určitých vlastnostech (např. podzemní vodu). Pokud propustnost vztáhneme k proudění, můžeme její míru vyjádřit pomocí koeficientu. Koeficient filtrace  $k$  představuje směrnici lineární závislosti rychlosti proudění na hydraulickém gradientu v Darcyho zákoně:[17]

$$k = p \cdot v_s = -K_r K_{sat} \nabla h \quad [\text{m/s}] \quad (2.7)$$

Kde  $p$  - pórovitost  
 $K_r$  - relativní koeficient filtrace  
 $K_{sat}$  - matice hydraulické vodivosti  
 $\nabla h$  - hydraulický gradient  
 $v_s$  - střední rychlost

Koeficient filtrace je možné stanovit z křivky zrnitosti, z laboratorního měření pomocí propustoměru, karotáží ve vrtu (rezistivimetrie) nebo hydrodynamickými zkouškami (HDZ).

### 2.3.2 Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je založena na jevu kapilární deprese projevující se tím, že při ponoření pevné porézní látky do rtuti, která ji nesmáčí (tj. úhel smáčení je větší než  $90^\circ$ ), může rtuť vniknout do jejích pórů pouze účinkem vnějšího tlaku. Tento tlak musí být tím větší, čím užší póry mají být zaplněny. Kvantitativně vyjádřil příslušný vztah již v roce 1921 Washburn vzorcem:[8]

$$g\rho hr^2 = 2\pi r\gamma \cdot \cos \Theta \quad (2.8)$$

Kde	$g$	-	<i>zrychlení, <math>[m/s^2]</math></i>
	$\rho$	-	<i>hustota rtuti, <math>[g/m^3]</math></i>
	$h$	-	<i>výška sloupce rtuti v póru, <math>[m]</math></i>
	$r$	-	<i>poloměr póru kruhového průřezu, <math>[m]</math></i>
	$\gamma$	-	<i>povrchové napětí rtuti v póru, <math>[N/m]</math></i>
	$\Theta$	-	<i>úhel smáčení stěn pórů rtuti.</i>

Poloměr zaplněného póru je tedy nepřímě úměrný hodnotě použitého tlaku, takže při nejmenších tlacích jsou rtutí zaplněny póry o největším poloměru a každý přírůstek tlaku vyvolává vniknutí rtuti do frakce pórů o příslušném menším poloměru.

Při formulování kvantitativního popisu bylo přijato několik zjednodušujících předpokladů: pevná látka má póry s neelastickými stěnami a s pravidelným tvarem (tento tvar je však u reálných materiálů málo pravděpodobný, a proto je třeba na hodnotu poloměru pohlížet jako na efektivní hodnotu); povrchové napětí rtuti a její smáčecí úhel s povrchem pevné látky jsou uvažovány za nezávislé na tlaku.

Princip měření rtuťovým porozimetrem spočívá ve sledování závislosti vloženého tlaku na úbytku rtuti v nádobce, z níž je rtuť vytlačována do pórů měřeného

materiálu. Úbytek rtuti a tím zjištění tzv. intruzního objemu se v moderních přístrojích určuje například ze změny kapacity kondenzátoru, který je tvořen kovovou vrstvou nanesenou na skleněné kapiláře a rtutí, která kapiláru částečně zaplňuje. Vysokých tlaků (200 MPa nebo 400 MPa) je dosaženo pomocí tlakových násobičů (multiplikátorů).

Vlastní měření je prováděno na přístroji PoreSizer 9320 od U. S. firmy Micromeritics (obr. 2.7). V průběhu analýzy dochází k postupnému zvyšování tlaku a zaznamenávání objemu rtuti vtlačené do pórů. Z odečtených údajů lze sestavit tzv. kumulativní distribuci pórů, která vyjadřuje závislost objemu pórů s poloměry většími, než odpovídá okamžitému tlaku podle Washburnovy rovnice. Záporně vzatou derivací této závislosti se získá frekvenční křivka rozdělení pórů podle poloměru názorně ukazující, které póry přispívají k celkovému objemu pórů nejvíce. Souhrnně lze říci, že metoda rtuťové porozimetrie patří mezi rychlé a poměrně jednoduché metody sloužící k charakterizaci struktury pevných porézních materiálů a stanovení distribuce rozdělení pórů v oblasti mezopórů. Z výše uvedených informací vyplývají základní požadavky na zkoumané vzorky. Pro stanovení lze použít s výhodou kusový, ale i práškový materiál. Problematická bývá u práškových materiálů korekce na objem rtuti vyplňující prostor mezi jednotlivými zrny materiálu. Pro urychlení analýzy je vhodné odstranit ze vzorku vlhkost a další naadsorbované plyny. Vzorek je po analýze znehodnocen, neboť je kontaminován rtutí. Stanovená distribuce pórů závisí na použitém modelu, takže se vlastně jedná o distribuci pórů v modelovém prostředí válcových neprotínajících se pórů. Nelze proto brát výsledky absolutně, ale spíše pro porovnání materiálů mezi sebou. [8]



Obr. 2.7 PoreSizer 9320 [15]

### 2.3.3 Přístroje na měření pórovitosti

Jedním z přístrojů pro měření pórovitosti je např. POROSCOPE HV20, obr. 2.8. Tento přístroj je přenosný a je určen pro zkoušky izolačních vrstev na elektricky vodivých podkladech. Dalším přístrojem nebo spíše softwarem může být LUCIA Concrete. Jedná se o software, určený pro univerzální obrazovou analýzu. Zprostředkovává přenos obrazu z optických zařízení do PC a jeho následnou analýzu. Tento software je především určen pro stanovení pórovitosti betonu. Měřené vzorky betonu jsou nejprve pečlivě vyleštěny a vzduchové póry jsou zvýrazněny zinkovou bělobou dle normy, vše ostatní je nabarveno tmavou barvou. Obsah vzduchu v mikropórech je pak měřen pomocí traverzní metody. Díky motorizovanému stolku ovládanému z PC je možné celé měření automatizovat a tím významně zrychlit celý postup. Naměřené hodnoty obsahu vzduchu v mikropórech jsou měřítkem mrazuvzdornosti betonu. Systém, jak je vidět na obr. 2.9, se skládá z následujících částí: stativ vlastní konstrukce, optika, kamera, motorizovaný stolek, motorizované ostření, LED osvětlovač, PC a software LUCIA Concrete.[10][11]



Obr. 2.8 POROSCOPE HV20 [11]



Obr. 2.9 LUCIA Concrete [10]

### 2.3.4 Stanovení nasákavosti

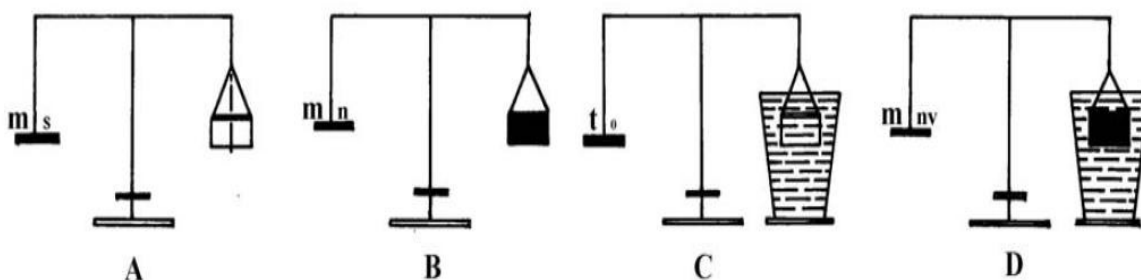
Nasákavost je jedním z nejdůležitějších parametrů, který charakterizuje mikrostrukturu zkoumaného vzorku, a to konkrétně jeho pórovitou strukturu. Patří k nejčastějším zkouškám v keramice. Nasákavost odpovídá struktuře materiálu. Vysoká nasákavost odpovídá pórovité struktuře, zatímco hutný a slinutý výrobek má nasákavost nízkou.

Stanovuje se v % jako poměr hmotnosti vody pohlcené zkušebním vzorkem k hmotnosti vysušeného vzorku za podmínek stanovených normou.

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.9)$$

Kde  $m_n$  - hmotnost vzorku po zkoušce nasákavosti  
 $m_s$  - hmotnost vysušeného vzorku

Pro stanovení nasákavosti vakuovou metodou se vysušují vzorky při 110°C do ustálené hmotnosti, zváží se a uloží na rošt do nádoby umístěné v exsikátoru tak, aby se vzorky nedotýkaly stěn nádoby ani vzájemně mezi sebou. Z nádoby (exsikátoru) se pomocí vodní vývěvy odčerpá vzduch. Vzorky se zalijí do jejich poloviny vodou a v nádobě je stále podtlak. Poté vzorky zalijeme vodou úplně, aby hladina byla 2cm nad nejvyšším vzorkem. Po určité době se zruší podtlak, vzorky se vytáhnou a může se přejít k hydrostatickému vážení. Jednotlivé vzorky jsou postupně vyjímány z nádoby, váženy hydrostaticky a vráceny zpět do nádoby s vodou. Po zvážení všech vzorků ve vodě jsou nasáklé vzorky váženy na vzduchu, postupně jsou vyjímány z vody, na povrchu otírány vyždímanou vlhkou tkaninou a ihned váženy.[13]



Obr. 2.10 Schematický postup hydrostatického vážení[13]

## 2.4 Tlaková ztráta definována v porézním prostředí

Tlaková ztráta při proudění tekutiny porézním prostředím je definována dle níže uvedené rovnice (2.11). Rovnice se skládá z viskózního členu a členu setrvačného.[4]

$$\Delta p = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \cdot \Delta n \quad (2.10)$$

Dále tlaková ztráta při homogenním proudění je definována:

$$\Delta p = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \cdot \Delta n \quad (2.11)$$

Kde	$v_j$	-	<i>rychlost proudění</i>
	$D, C$	-	<i>předepsané matice</i>
	$\mu$	-	<i>kinematická viskozita vzduchu</i>
	$ v $	-	<i>velikost rychlosti</i>
	$C_2$	-	<i>vnitřní odporový součinitel.</i>
	$\alpha$	-	<i>permeabilita prostředí</i>
	$\Delta n$	-	<i>tloušťka porézního prostředí[4]</i>

Pro laminární proudění skrz porézní prostředí je pokles tlaku přímo úměrný rychlosti a druhý člen (setrvační člen) v definované rovnici 2.11 můžeme zanedbat. Jestliže ignorujeme konvekční zrychlení a jeho šíření, model porézního prostředí se zjednoduší na Darcyho zákon. [4]

$$\nabla p = - \frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (2.12)$$

Tlaková ztráta v případě laminárního proudění v obecné prostorové oblasti může být definována pro jednotlivé směry kartézského souřadného systému (x,y,z) pomocí následujících vzorců:[4]

$$\Delta p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \quad (2.13)$$

$$\Delta p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \quad (2.14)$$

$$\Delta p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \quad (2.15)$$

Kde	$1/a_{ij}$	-	<i>vstupní hodnoty matice D z rovnice 2.10</i>
	$v_j$	-	<i>složky rychlosti ve směrech x, y a z</i>
	$\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$	-	<i>tloušťky média ve směrech x, y a z. [4]</i>

## 2.5 Odpor prostředí

Odpor prostředí je soubor všech sil, kterými tekutiny působí proti pohybu těles v něm. Odpor je způsoben třením, které vzniká při kontaktu tělesa a prostředí. Protože pohyb je relativní, je jedno, jestli se těleso pohybuje v nehybném plynu nebo kapalině, nebo jestli je těleso v klidu a kolem něj proudí plyn nebo kapalina (v takovém případě se často hovoří o obtékání těles). Rozhodující je relativní rychlost mezi tělesem a tekutinou.

Síly, které v důsledku tření působí proti pohybu tělesa, se označují jako odporové síly. Odporová síla působí vždy proti směru relativního pohybu, tzn. těleso pohybující se v nehybné tekutině je zpomalováno, zatímco nehybné těleso v pohybující se tekutině je tekutinou strháváno.

Lze dokázat, že při obtékání libovolného tělesa ideální tekutinou nebo při pohybu tělesa v klidné ideální tekutině nepůsobí na těleso odporová síla. Sledujeme-li např. pohyb koule v ideální tekutině, zjistíme, že proudové čáry jsou kolem tělesa rozloženy symetricky. Na zadní straně tělesa jsou proudnice stejně uspořádány jako na přední straně tělesa. Na základě této symetrie lze dokázat, že na těleso působí zepředu i zezadu stejná tlaková síla a výslednice působících sil je nulová. Závěr, že na těleso pohybující se ideální tekutinou nepůsobí odporová síla, je platný nejen pro kouli, ale

pro těleso libovolného tvaru. Tento paradoxní teoretický jev bývá nazýván d'Alembertův paradox (d'Alembertovo paradoxon).

Při pohybu tělesa ve viskózní kapalině klade proudící kapalina odpor proti pohybu tělesa. Při nízkých rychlostech je odporová síla považována za přímo úměrnou rychlosti pohybu. Při vyšších rychlostech obvykle odporovou sílu považujeme za úměrnou druhé mocnině rychlosti.[18]

Příkladem může být pomalý pohyb koule v nekonečném prostředí. Pokud můžeme proudění kolem koule považovat za laminární, tzn. při nevelkých rychlostech, pak platí Stokesův vztah pro odporovou sílu:

$$F = 6\pi\eta r v \quad [N] \quad (2.16)$$

kde	$\eta$	-	dynamická viskozita
	$r$	-	poloměr pohybující se koule
	$v$	-	rychlost pohybu koule

Zobecněním na libovolný tvar pohybujícího se těla získá tento vztah tvar:

$$F = k\eta l v \quad [N] \quad (2.17)$$

kde	$k$	-	<i>konstanta úměrnosti</i>
	$\eta$	-	<i>dynamická viskozita</i>
	$l$	-	<i>charakteristický rozměr tělesa</i>
	$v$	-	<i>rychlost pohybu.</i>

V praktickém využití porézních materiálů je nutné počítat s hydraulickými odpory porézních prvků. Tento odpor závisí na vlastnostech porézního média, jako je velikost, tvar a povrch média. Podmínkou proudění kapaliny je průchodnost média přes tzv. póry a vlastnosti kapaliny. Měřením hydraulického odporu v různých porézních prostředích za stejných filtračních podmínek je možné spočítat její závislost na vlastnostech média. Tedy při vyšetřování odporu porézního média vyrobeného z hladkých kulových částic bylo zjištěno, že pro laminární proudění koeficient hydraulického odporu může být spočítán vztahem:[14]



$$\zeta_d = \frac{38}{\text{Re}_d} \quad [1] \quad (2.18)$$

Kde

$$\zeta_d = \frac{\Delta p \cdot d_p}{2\rho W_p^2 \cdot h} \quad [1] \quad (2.19)$$

$$\text{Re}_d = \frac{W_p \cdot d_p \cdot \rho}{\mu} \quad [1] \quad (2.20)$$

Kde	$\text{Re}_d$	-	Reynoldsovo číslo pro porézní prostředí
	$\Delta p$	-	tlaková ztráta porézního vzorku
	$W_p$	-	rychlost kapaliny (spočítána jako $W_f = W_{p\pi}$ )
	$W_f$	-	filtrační rychlost
	$d_p$	-	velikost pórů porézního média,
	$h$	-	tloušťka porézního vzorku v přímém směru průtoku
	$\rho$ a $\mu$	-	hustota a koeficient viskozity průtočné kapaliny.

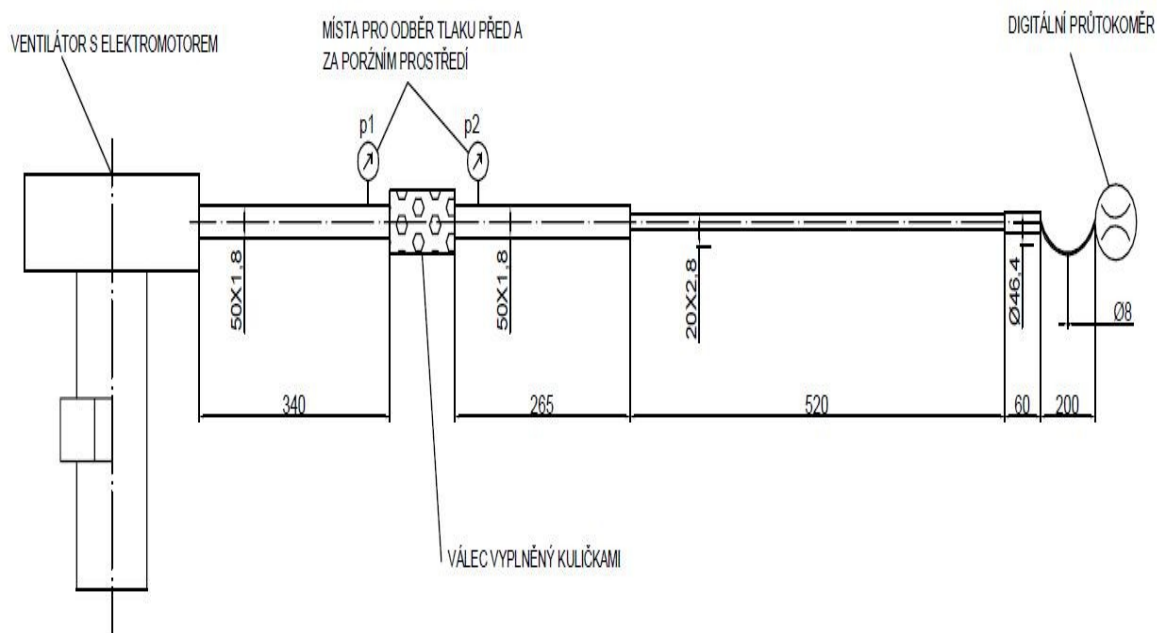
Experimenty ukazují, že při průtoku porézním médiem náhodného tvaru pro laminární proudění je rovnice 2.19 nedostačující. Hlavní forma je sice zachována, nenumerný koeficient hlavně závisí na tvaru a povrchových vlastnostech částic, ze kterých je materiál vyroben.[14]

### 3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘÍCÍ TRATĚ

Měření odporu porézního materiálu probíhalo na experimentálních měřicích tratích, sestavených ve školní laboratoři mechaniky tekutin na místnosti E306. Vytvořené tratě k určení odporu porézního prostředí se od sebe odlišují v důsledku potřeb a charakteru jednotlivých měřicích prvků. Každá měřicí trať obsahovala jeden nebo dva ventilátory poháněné elektromotorem, který je ovládán frekvenčním měničem. Do vzduchové tratě byl vložen válec s kuličkami, které byly uchyceny kovovou mřížkou z obou stran. Kuličky byly průměru 3mm a 6mm. Měřicí válec byl dvojího provedení, a to delší a kratší.

### 3.1 Varianta měření porézního prostředí na experimentální měřicí trati s jedním ventilátorem

Frekvenčním měničem jsem nastavoval průtok vzduchu pomocí změny frekvence a tedy změny otáček ventilátoru. Pro každou hodnotu otáček ventilátoru, řízeného frekvenčním měničem skokem o  $5\text{Hz}$ , čili z  $20\text{Hz}$  až na  $100\text{Hz}$ , jsem odečetl hodnoty tlakové difference ( $\Delta p$ ) měřené před a za porézním prostředím. Porézní prostředí představuje válec, který byl naplněný kuličkami. Tlaková ztráta je měřena snímačem tlakové difference, který je napojen na vyhodnocovací zařízení. V prvním měření byl válec naplněný kuličkami o průměru  $6\text{mm}$  a v druhém měření kuličkami o průměru  $3\text{mm}$ . Kromě tlakové ztráty ( $\Delta p$ ) byl měřen také průtok vzduchu ( $Q_v$ ) pomocí digitálního průtokoměru. Konkrétní rozměry a světlosti potrubí sestavené měřicí tratě včetně použitých prvků jsou ve schématu na obr. 3.1



Obr. 3.1 Schéma experimentální tratě s jedním ventilátorem

**Použité prvky:**

- Ventilátor s elektromotorem a FM
- Snímač tlakové difference napojený na odběrná místa
- Válec vyplněný kuličkami
- Digitální průtokoměr
- Odpadní potrubí HT
- Hadice

Reálná podoba měřicí tratě je zobrazena na obr. 3.2. Z obrázku je patrný ventilátor a vyhodnocovací zařízení, včetně samotné měřicí trati.



Obr. 3.2 Sestava skutečné měřicí trati s jedním ventilátorem

Detail válce vyplněného kuličkami je znázorněný na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Válec naplněný kuličkami o průměru 6mm (vpravo) a 3mm (vlevo)

### 3.2 Postup měření varianty s jedním ventilátorem

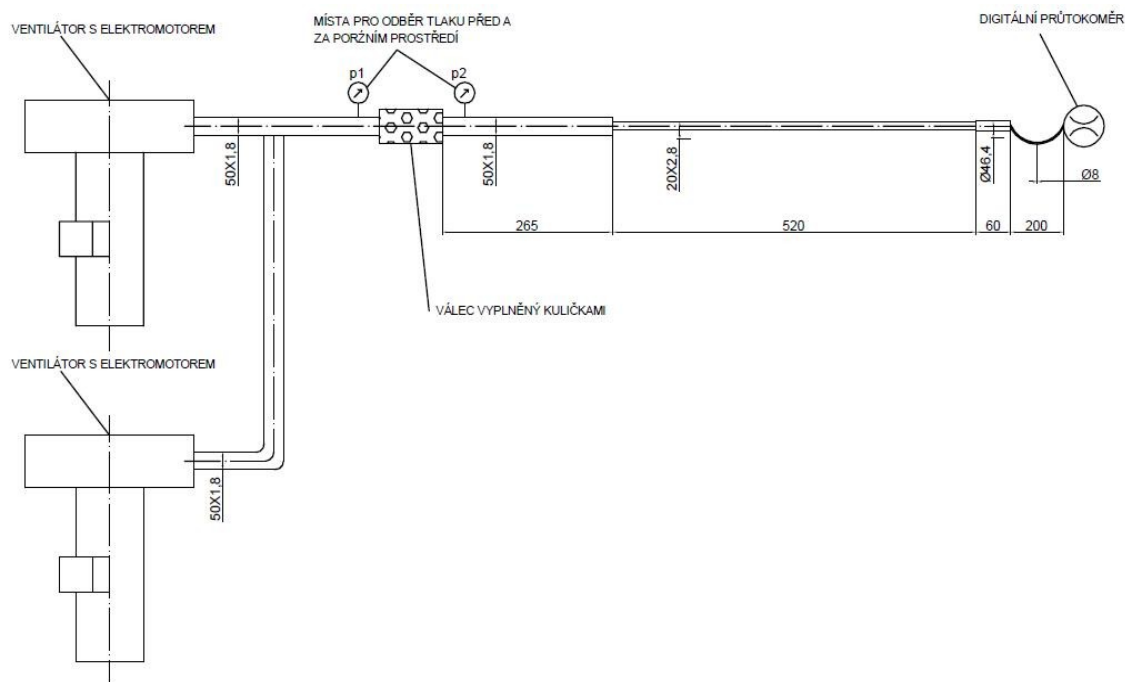
Sestavení vzduchové trati bylo velice jednoduché a rychle realizovatelné. K ventilátoru, který byl ovládaný frekvenčním měničem, jsem připojil plastovou

odpadní trubku HT o vnitřním průměru  $d=46,4\text{mm}$ . Na trubku byl dále připojen válec, který byl upraven tak, aby se mohl naplnit kuličkami, které představovaly porézní prostředí. Do válce byl vsunut ocelový kroužek a do kroužku nasypány kuličky, které byly drženy kovovou mřížkou z obou stran. Odběry tlaků k měření tlakové ztráty jsou realizovány pomocí vývodů umístěných před a za ocelovým kroužkem. Vývody byly napojeny silikonovými hadičkami na snímač tlakové difference. Následně byl snímač propojen s vyhodnocovacím zařízením. Na válec byla napojena další plastová trubka s vnitřním průměrem  $d=46,4\text{mm}$ . Následně byl průměr potrubí postupně snižován až na hadicové napojení, na které byl napojen digitální průtokoměr. Digitální průtokoměr byl napájen zdrojem napětí o velikosti 24V.

Celé zařízení bylo uvedeno do provozu hlavním jističem, který napájí ventilátor. Na frekvenčním měniči byla postupně nastavována frekvence od 20Hz do 100Hz. Při prvním měření byla odečtena tlaková ztráta ( $\Delta p$ ) na vyhodnocovacím zařízení a velikost průtoku ( $Q_v$ ) na digitálním průtokoměru. Dané hodnoty byly zapsány do tabulky. Stejně jsem postupoval pro daný frekvenční rozsah v následujících krocích: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100Hz. Po dokončení měření byl vypnut frekvenční měnič a následně i hlavní jistič.

### **3.3 Varianta měření porézního prostředí na experimentální měřící trati se dvěma ventilátory**

Tato varianta je obdobná, jak je popsáno v kapitole 3.1 s tím rozdílem, že vzduchová trať má dva ventilátory. Každý ventilátor je ovládaný svým vlastním frekvenčním měničem. Frekvenční měniče byly nastaveny opět na počátečních 20Hz a postupným zvyšováním až na maximální hodnotu 100Hz. Sestavení trati je rovněž zobrazené na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Schéma experimentální tratě se dvěma ventilátory

Použité prvky:

- Ventilátory s elektromotorem a FM
- Koleno
- Snímač tlakové difference napojený na odběrná místa
- Válec naplněný kuličkami
- Digitální průtokoměr
- Odpadní potrubí HT
- Hadice

Reálná podoba měřicí tratě je zobrazena na obr. 3.5. Na obrázku jsou patrné propojení obou ventilátorů se vzduchovou tratí.



Obr. 3.5 Sestava skutečné měřicí tratě se dvěma ventilátory

### 3.4 Postup měření varianty se dvěma ventilátory

Zapojení této varianty je velmi podobné, jak je popsáno v předchozí kapitole (3.1). Trať se liší pouze do místa, kde je válec s kuličkami. Před válcem je umístěná rozbočka, která paralelně spojuje dva ventilátory. Napojení druhého ventilátoru je realizované pomocí kolen a odpadního potrubí HT.

## 4 SPECIFIKACE PRVKŮ A MĚŘIDEL

Experimentální měřicí tratě jsou sestaveny z těchto prvků:

- Ventilátor s elektromotorem
- Frekvenční měnič
- Digitální průtokoměr
- Potrubí
- Kuličky
- Vyhodnocovací zařízení
- Snímač tlakové difference
- Zdroj napájení digitálního průtokoměru

#### *Ventilátor s elektromotorem*

Typ:	HRD 1 TFU-150Hz/0,75 kW
Výrobce:	Energoekonom, spol. s.r.o.
Tlak:	4900 Pa
Průtok:	11 m <sup>3</sup> /min
Výkon elektromotoru:	0,75 kW
Napětí:	3 x 400 V
Frekvence:	105 Hz
Otáčky:	6200 min <sup>-1</sup>



Obr. 4.1 Ventilátor s elektromotorem [17]

### ***Frekvenční měnič***

Typ:	Combivert F5-B (Basic)
Výrobce:	Karl E. Brinkmann GmbH
Výkon:	0,75 kW
Napětí:	3 x 400V



Obr. 4.2 Frekvenční měnič [17]

### ***Digitální průtokoměr***

Typ:	PFM750-C8-E
Výrobce:	SMC
Rozsah průtoku:	1 ÷ 50 l/min
Maximální tlak:	0,75 MPa



Obr. 4.3 Digitální průtokoměr

### ***Vyhodnocovací zařízení***

Typ:	Almeno 2290-3
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Napájení:	9 V
Vstup:	2 analogové vstupy
Výstup:	2 analogové výstupy



Obr. 4.4 Vyhodnocovací zařízení[17]

### ***Snímač tlakové difference***

Typ:	Almeno FD A602-S6K
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Měřicí rozsah:	0 ÷ 6800 Pa
Výstup:	analogový (6 ÷ 13 V)
Přesnost:	± 0,5%



Obr. 4.5 Snímač tlakové difference



### ***Zdroj napájení digitálního průtokoměru***

Napětí: 24V  
 Proud: 500mA



Obr. 4.6 Zdroj napájení digitálního

průtokoměru

### ***Snímač tlakové difference***

Typ FD8612DPS  
 Měřicí rozsah: 0-2500 Pa  
 Výstup: analogový (0-2 V)  
 Napájecí napětí: 6V  
 Přesnost:  $\pm 1\%$   
 Přetížitelnost: pěti násobná



Obr. 4.7 Zdroj Snímač tlakové difference

### ***Kuličky***

Průměr: 3 a 6 mm



Obr. 4.8 Kuličky o průměru 6mm a 3mm

### ***Potrubí***

Odpadní potrubí HT

Materiál: Plast  
 Světlost: 46,4



## 5 ZÁKLADNÍ VZTAHY K VYHODNOCOVÁNÍ MĚŘENÍ

### 5.1 Obecný postup výpočtu

- a) Na vyhodnocovacím zařízení jsem odečetl velikost tlakové ztráty  $\Delta p_l = p_1 - p_2$  proudícího vzduchu skrz porézní prostředí pro jednotlivé frekvence (20-100Hz). Na digitálním průtokoměru jsem odečetl velikost průtoku vzduchu ( $Q_v$ ). Následně jsem zapsal hodnoty do tabulky.

- b) Velikost střední rychlosti proudění vzduchu v porézním prostředí ( $v_s$ ) dostaneme z rovnice kontinuity (Zákon zachování hmotnosti).

$$Q_v = S \cdot v_s \Rightarrow v_s = \frac{Q_v}{S} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.1)$$

Kde  $Q_v$  - průtok vzduchu odečtený na digitálním průtokoměru  
 $S$  - průtočný průřez porézním prostředím

- c) Reynoldsovo číslo ( $Re$ ) získáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (5.2)$$

Kde  $d_k$  - vnitřní průměr porézního prostředí  
 $v_s$  - střední rychlost proudění vzduchu  
 $\nu$  - kinematická viskozita vzduchu za podmínek  $t = 20^\circ C$  a  $p = 0,1 MPa$   $\nu = 15,32 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$

- d) Sestrojil jsem závislost tlakové ztráty porézního prostředí na střední rychlosti vzduchu v trati ( $\Delta p = f(v_s)$ ), pomocí regrese se stanoví typ a koeficienty funkčních závislostí.

- e) Stanovení odporového součinitele ( $C_2$ ) a permeability prostředí ( $\alpha$ ) z rovnice pro tlakovou ztrátu jednoduchého porézního prostředí.

$$\Delta p = \left( \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 \right) \cdot t \quad [Pa] \quad (5.3)$$

Kde	$v_s$	-	<i>střední rychlost vzduchu</i>
	$\alpha$	-	<i>permeabilita prostředí</i>
	$\mu$	-	<i>kinematická viskozita vzduchu</i>
	$C_2$	-	<i>vnitřní odporový součinitel porézního prostředí</i>
	$\rho$	-	<i>hustota vzduchu</i>
	$t$	-	<i>tloušťka porézního prostředí</i>

- f) Stanovení pórovitosti porézního prostředí z měřeného vzorku.

$$p_m = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad [-] \quad (5.4)$$

Kde	$V_1$	-	<i>objem válce</i>
	$V_2$	-	<i>celkový objem kuliček</i>

- g) Stanovení pórovitosti ( $p$ ) uspořádaných kuliček ve válci (použití rovnice 2.5 z kapitoly 2.3)

$$p = \frac{d^3 - \frac{\pi d^3}{6}}{d^3} \quad [-] \quad (5.5)$$

Kde	$d$	-	<i>průměr kuličky</i>
-----	-----	---	-----------------------

- h) Porovnání pórovitosti ( $p$ ), určené z rovnice pro pórovitost porézního prostředí z měřeného vzorku a rovnice pórovitosti pro kulová zrna.

## 5.2 Vyhodnocení měření pro variantu s jedním ventilátorem

Ukázka výpočtu pro první řádek z tabulky 5.1 pro variantu s jedním ventilátorem, válcem o průměru  $d=39,17mm$  a délky  $h=19,17mm$  naplněného kuličkami o průměru  $6mm$ .

6mm					
Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty	
f	Qv	Qv	Δp	v <sub>s</sub>	Re
Hz	l/min	m <sup>3</sup> /s	Pa	m/s	1
20	5.8	9.66667E-05	1	0.078091875	202.366
25	7.7	0.000128333	2	0.103673696	268.6583
30	9.5	0.000158333	3	0.127909105	331.4616
35	11.3	0.000188333	4	0.152144514	394.2648
40	13.1	0.000218333	5	0.176379924	457.0681
45	14.8	0.000246667	7	0.199268921	516.3823
50	16.7	0.000278333	9	0.224850742	582.6746
55	18.6	0.00031	11	0.250432563	648.9669
60	20.5	0.000341667	12	0.276014384	715.2592
65	22.5	0.000375	14	0.302942617	785.0406
70	24.4	0.000406667	17	0.328524438	851.3329
75	26.3	0.000438333	22	0.354106259	917.6252
80	28	0.000466667	25	0.376995257	976.9394
85	29	0.000483333	29	0.390459373	1011.83
90	31.5	0.000525	33	0.424119664	1099.057
95	33.4	0.000556667	38	0.449701485	1165.349
100	35.5	0.000591667	41	0.477976129	1238.62

Tab. 5.1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot varianty s jedním ventilátorem, válcem o rozměrech  $(\varnothing 39,7 \times 19,17)mm$  naplněného kuličkami o průměru 6mm

### Střední rychlost vzduchu

$$Q_v = S \cdot v_s \Rightarrow v_s = \frac{Q_v}{S} = \frac{9,66667 \cdot 10^{-5}}{123,7858 \cdot 10^{-5}} = 0,078091875 m/s \quad (5.6)$$

Kde  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0397^2}{4} = 123,7858 \cdot 10^{-5} m^2$  ( $d$  je vnitřní průměr válce naplněného kuličkami).

### Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} = \frac{0,078091875 \cdot 0,0397}{15,32 \cdot 10^{-6}} = 202,366 \Rightarrow \text{laminární proudění} \quad (5.7)$$

Mocninná závislost tlakové ztráty na rychlosti je určena z grafu (Obr. 5.2):

$$\Delta p = 198,21 v_s^2 - 7,4184 v_s \quad (5.8)$$

$$R^2 = 0,994$$

**Vnitřní odporový součinitel ze vztahu pro tlakovou diferenci**

$$\Delta p = \left( \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 \right) \cdot t \quad (5.9)$$

$$C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 t = 198,21 v_s^2 \Rightarrow C_2 = \frac{2 \cdot 198,21}{\rho \cdot t} = \frac{2 \cdot 198,21}{1,1965 \cdot 0,01917} = 17283,06413 m^2 \cdot kg^{-1}$$

Kde  $t$  je tloušťka porézního prostředí ( $t=h$ ).

**Permeabilita porézního prostředí**

$$\Delta p = \left( \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 \right) \cdot t \quad (5.10)$$

$$\frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s \cdot t = 7,4184 v_s \Rightarrow \alpha = \frac{\mu \cdot t}{7,4184} = \frac{15,32 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01917}{7,4184} = 3,95886 \cdot 10^{-8} m$$

**Pórovitost porézního prostředí z měřeného vzorku**

$$p_m = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{23729,74153 - 13119,29092}{23729,74153} = 0,447137218 \quad (5.11)$$

Objem válce

$$V_1 = \pi r^2 h = \pi \cdot 19,85^2 \cdot 19,17 = 23729,74153 mm^3 \quad (5.12)$$

Objem jedné kuličky o průměru 6mm

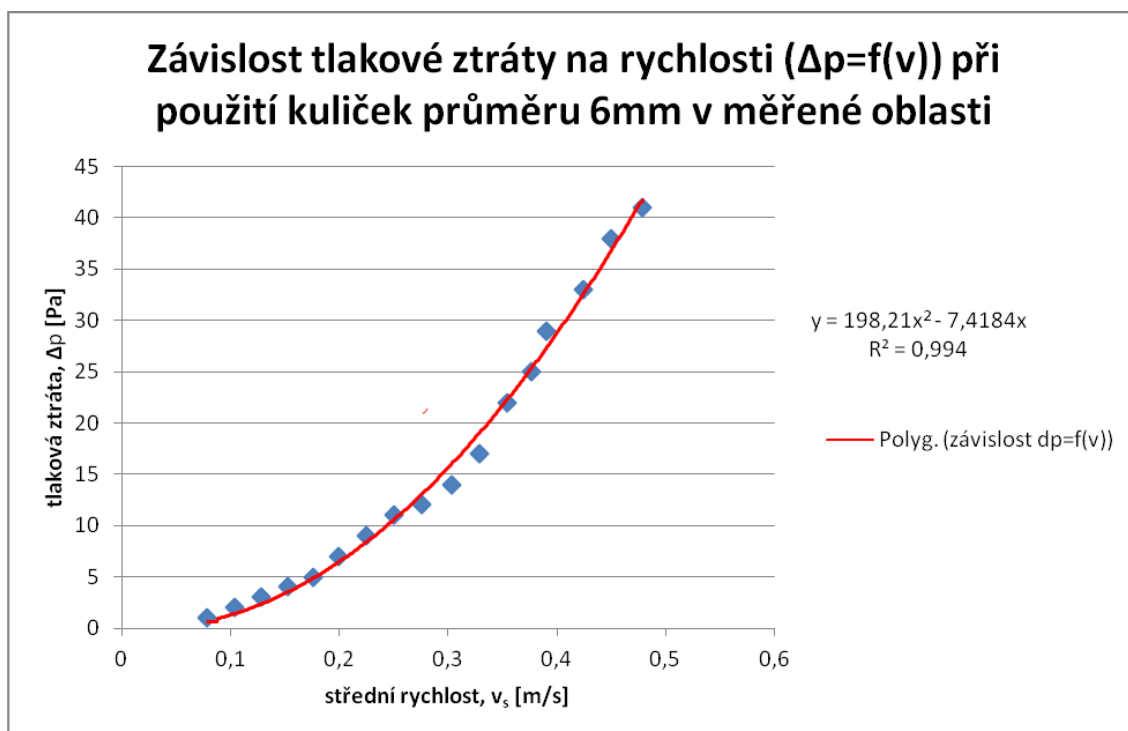
$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot 3^3 = 113,0973355 mm^3 \quad (5.13)$$

Celkový objem kuliček (116kusů)

$$V_2 = 116 \cdot V = 116 \cdot 113,0973355 = 13119,29092 mm^3 \quad (5.14)$$

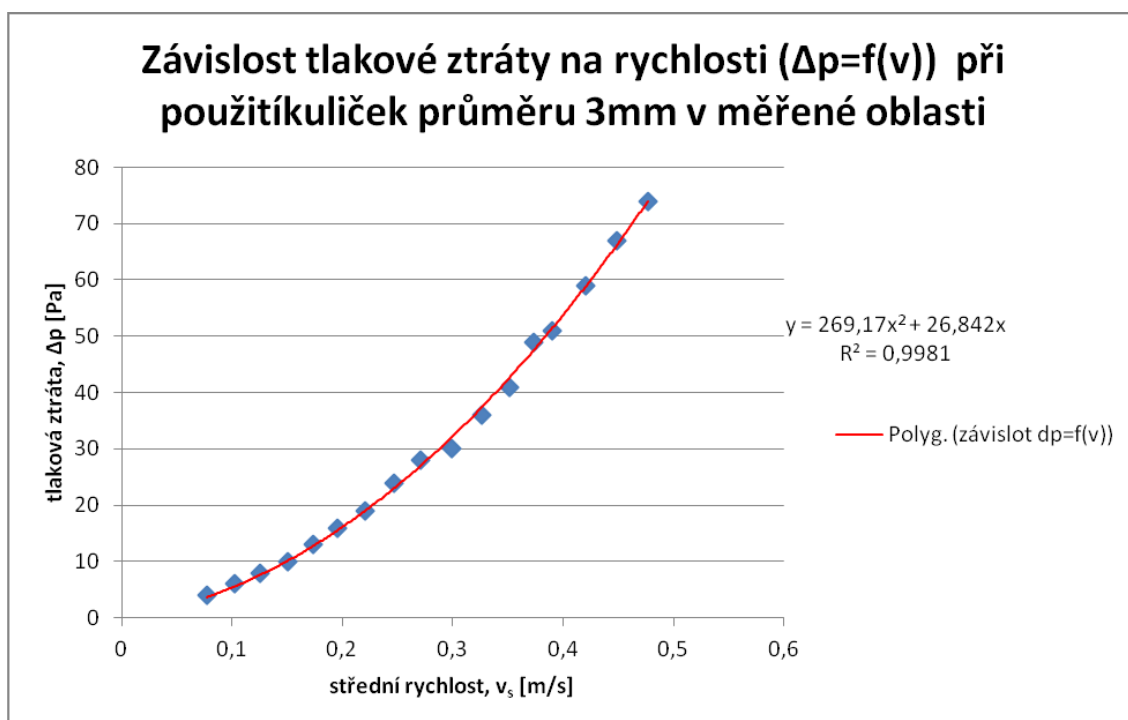
**Stanovení pórovitost ( $p$ ) uspořádaných kuliček ve válci**

$$p = \frac{d^3 - \frac{\pi d^3}{6}}{d^3} = \frac{0,006^3 - \frac{\pi \cdot 0,006^3}{6}}{0,006^3} = 0,476401224 \quad (5.15)$$



Obr. 5.2 Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti kuliček průměru 6mm

Obdobným způsobem bylo realizováno měření tlakové ztráty porézního prostředí pro válec vyplněný kuličkami o průměru 3mm. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot jsou uvedeny v příloze. Závislost tlakové ztráty ( $\Delta p=f(v)$ ) při použití kuliček průměru 3mm je uvedená na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti kuliček průměru 3mm

Z naměřených hodnot byla stanovena permeabilita a pórovitost porézního prostředí. Velikosti pórovitosti ( $p=0,4471$  a  $p_m=0,4764$ ) jsou stanoveny pomocí rovnic (5.11 a 5.15) pro variantu měření s kuličkami o průměru  $d=6mm$ . Při porovnání grafů ( $\Delta p=f(v)$ ) je patrné, že tlaková ztráta při použití kuliček o průměru  $d=3mm$  je vyšší než u kuliček průměru  $d=6mm$ . U kuliček o průměru  $d=6mm$  je maximální tlaková ztráta při maximální střední rychlosti ( $v_s=\pm 0,5m/s$ ) vzduchu kolem  $40Pa$  a u kuliček o průměru  $d=3mm$  kolem  $75Pa$ . Jelikož kuličky o průměru  $3mm$  kladou při proudění vzduchu větší odpor, je vyšší i vnitřní odporový součinitel ( $C_2=23470,4726m^2/kg$ ), kdežto u kuliček průměru  $6mm$  je tento součinitel menší ( $C_2=17283,0641m^2/kg$ ).

## 6 NÁVOD CVIČENÍ PRO MĚŘENÍ ODPORU PORÉZNÍHO PROSTŘEDÍ

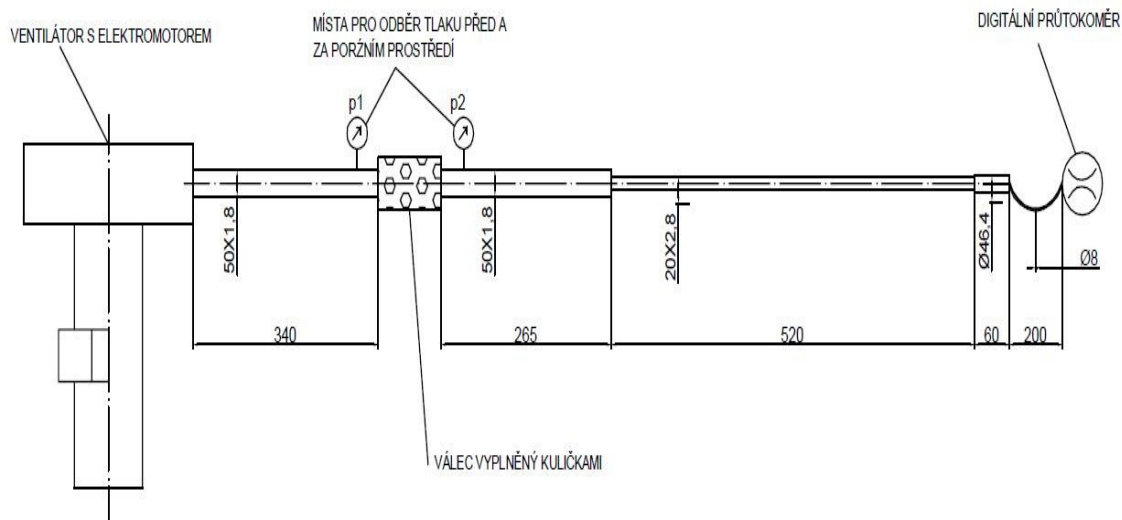
### 6.1 Zadání měření

Pro dané porézní prostředí stanovte tlakovou ztrátu porézního prostředí ( $\Delta p$ ) a průtočné množství vzduchu ( $Q_v$ ). Porézní prostředí realizujte připojením válce naplněného kuličkami na experimentální měřicí trati. Výsledky všech měření zapište do tabulek a zapsaná data vyhodnoťte. Závislosti tlakové ztráty na střední rychlosti ( $v_s$ ) vynesete do grafů. Stanovte velikost vnitřního odporového součinitele ( $C_2$ ), permeabilitu prostředí ( $\alpha$ ) a pórovitost ( $p$ ) daného porézního prostředí. Dané hodnoty porovnejte.

### 6.2 Schéma měřicí tratě

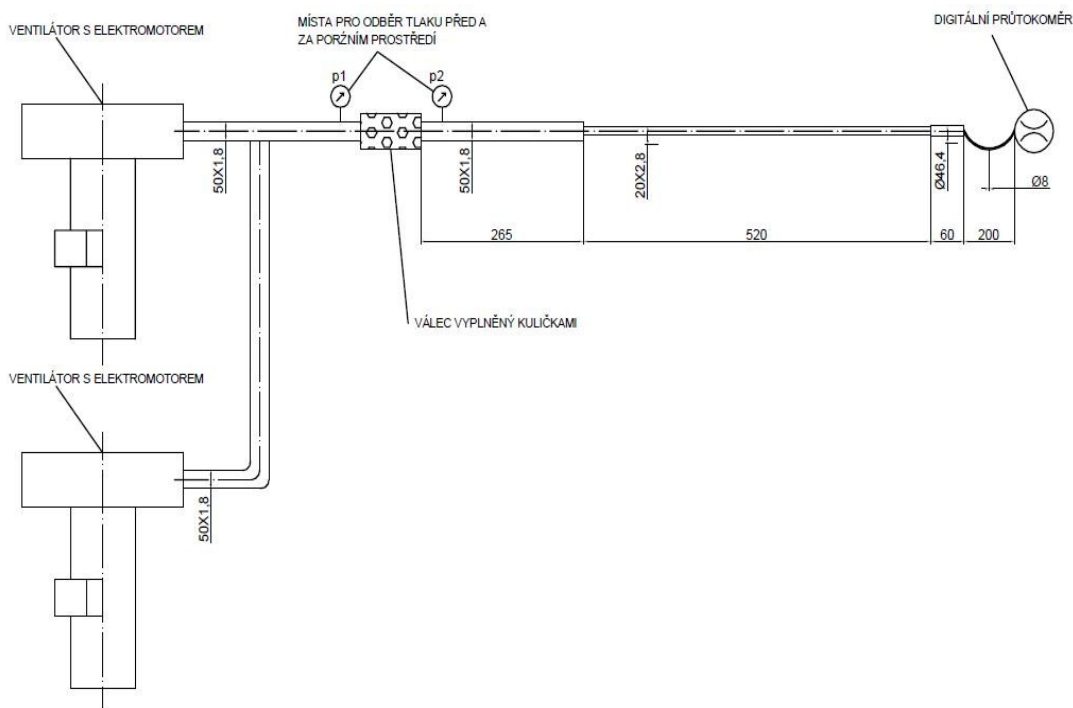
K ventilátoru, který je ovládaný frekvenčním měničem, připojte plastovou odpadní trubku HT o vnitřním průměru  $46,4mm$ . Na trubku bude dále připojen válec, který je upraven tak, aby se mohl naplnit kuličkami, které představují porézní prostředí. Do válce bude vsunut ocelový kroužek a do kroužku nasypány kuličky, které budou drženy kovovou mřížkou z obou stran. Odběry tlaků k měření tlakové ztráty budou realizovány pomocí vývodů umístěných před a za ocelovým kroužkem. Vývody budou spojeny silikonovými hadičkami na snímač tlakové difference a snímač na vyhodnocovací zařízení. Na válec bude napojena další plastová trubka s vnitřním průměrem  $d=46,4mm$ .

Následně bude průměr potrubí postupně snižován až na hadicové napojení, na které bude napojen digitální průtokoměr.



Obr. 6.1 Schéma experimentální tratě s jedním ventilátorem

Zapojení varianty se dvěma ventilátory (obr. 6.2) je velmi podobné jak u varianty s jedním ventilátorem. Trať se liší pouze do místa, kde je válec s kuličkami. Před válcem je umístěná rozbočka, která paralelně spojuje dva ventilátory. Napojení druhého ventilátoru je realizované pomocí kolen a odpadního potrubí HT.



Obr. 6.2 Schéma experimentální tratě se dvěma ventilátory jedním ventilátorem

### 6.3 Specifikace prvků

Experimentální měřicí tratě jsou sestaveny z těchto prvků:

- Ventilátor s elektromotorem
- Frekvenční měnič
- Digitální průtokoměr
- Potrubí
- Kuličky
- Vyhodnocovací zařízení
- Snímač tlakové difference
- Zdroj napájení digitálního průtokoměru

### 6.4 Postup měření

Praktické měření bude realizováno na sestavené měřicí trati uvedené na obr. 6.1 v kap. 6.2. Celé zařízení bude uvedeno do provozu hlavním jističem, který napájí frekvenční měnič. Na frekvenčním měniči bude postupně nastavována frekvence od 20Hz do 100Hz, čímž bude měněna velikost průtoku vzduchu ( $Q_v$ ). Při prvním měření bude odečtena tlaková ztráta ( $\Delta p$ ) na vyhodnocovacím zařízení pomocí snímače tlakové difference a velikost průtoku ( $Q_v$ ) na digitálním průtokoměru. Dané hodnoty budou zapsány do tabulky.

### 6.5 Zpracování naměřených a vypočtených hodnot

- Na vyhodnocovacím zařízení odečtete velikost tlakové ztráty  $\Delta p_1 = p_1 - p_2$  proudícího vzduchu skrz porézní prostředí pro jednotlivé frekvence (20-100Hz). Na digitálním průtokoměru odečtete velikost průtoku vzduchu ( $Q_v$ ). Následně zapište hodnoty do tabulky.
- Velikost střední rychlosti proudění vzduchu v porézním prostředí ( $v_s$ ) dostaneme z rovnice kontinuity (Zákon zachování hmotnosti).



$$Q_v = S \cdot v_s \Rightarrow v_s = \frac{Q_v}{S} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (6.1)$$

Kde  $Q_v$  - průtok vzduchu odečtený na digitálním průtokoměru  
 $S$  - průtočný průřez porézním prostředím

- Reynoldsovo číslo ( $Re$ ) získáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (6.2)$$

Kde  $d_k$  - vnitřní průměr porézního prostředí  
 $v_s$  - střední rychlost proudění vzduchu  
 $\nu$  - kinematická viskozita vzduchu za podmínek  $t = 20^\circ C$  a  
 $p = 0,1 MPa$   $\nu = 15,32 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$

- Sestrojte závislost tlakové ztráty porézního prostředí na střední rychlosti vzduchu v trati ( $\Delta p = f(v_s)$ ), pomocí regrese se stanoví typ a koeficienty funkčních závislostí.
- Stanovení odporového součinitele ( $C_2$ ) a permeability prostředí ( $\alpha$ ) z rovnice pro tlakovou ztrátu v jednoduchém porézním prostředí.

$$\Delta p = \left( \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 \right) \cdot t \quad [Pa] \quad (6.3)$$

Kde  $v_s$  - střední rychlost vzduchu  
 $\alpha$  - permeabilita prostředí  
 $\mu$  - kinematická viskozita vzduchu  
 $C_2$  - vnitřní odporový součinitel  
 $\rho$  - hustota vzduchu  
 $t$  - tloušťka porézního prostředí

- Stanovení pórovitosti porézního prostředí z měřeného vzorku.

$$p_m = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad [-] \quad (6.4)$$

Kde  $V_1$  - objem válce  
 $V_2$  - celkový objem kuliček

- Stanovení pórovitosti ( $p$ ) uspořádaných kuliček ve válci (použití rovnice 2.5 z kapitoly 2.3)

$$p = \frac{d^3 - \frac{\pi d^3}{6}}{d^3} \quad [-] \quad (6.5)$$

Kde  $d$  - průměr kuličky

- Porovnání pórovitosti ( $p$ ), určené z rovnice pro pórovitost porézního prostředí z měřeného vzorku a rovnice pórovitosti pro kulová zrna.

## 6.6 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

6mm					
Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty	
f	Qv	Qv	Δp	v <sub>s</sub>	Re
Hz	l/min	m <sup>3</sup> /s	Pa	m/s	1
60	20.5	0.000341667	12	0.276014384	715.2592

Tab. 6.3 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot varianty s jedním ventilátorem, válcem o rozměrech (ø39,7x19,17)mm naplněného kuličkami o průměru 6mm

## 6.7 Příklad výpočtu

Příklad výpočtu pro frekvenci 60Hz:

### Výpočet střední rychlosti

$$Q_v = S \cdot v_s \Rightarrow v_s = \frac{Q_v}{S} = \frac{34,1667 \cdot 10^{-5}}{123,7858 \cdot 10^{-5}} = 0,276014384 \text{ m/s}$$

Kde  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0397^2}{4} = 123,7858 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  ( $d$  je vnitřní průměr válce naplněného kuličkami).

### Reynoldsovo číslo

$$\text{Re} = \frac{v_s \cdot d}{\nu} = \frac{0,276014384 \cdot 0,0397}{15,32 \cdot 10^{-6}} = 715,2592 \Rightarrow \text{laminární proudění}$$

Mocninná závislost tlakové ztráty na rychlosti z grafu (obr 6.4) je:

$$\Delta p = 198,21 v_s^2 - 7,4184 v_s$$

$$R^2 = 0,994$$

### Vnitřní odporový součinitel

$$\Delta p = \left( \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 \right) \cdot t$$

$$C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 t = 198,21 v_s^2 \Rightarrow C_2 = \frac{2 \cdot 198,21}{\rho \cdot t} = \frac{2 \cdot 198,21}{1,1965 \cdot 0,01917} = 17283,06413 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Kde  $t$  je tloušťka porézního prostředí ( $t=h$ ).

### Permeabilita porézního prostředí

$$\Delta p = \left( \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2 \right) \cdot t$$

$$\frac{\mu}{\alpha} \cdot v_s \cdot t = 7,4184 v_s \Rightarrow \alpha = \frac{\mu \cdot t}{7,4184} = \frac{15,32 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01917}{7,4184} = 3,95886 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

### Pórovitost porézního prostředí z měřeného vzorku

$$p_m = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{23729,74153 - 13119,29092}{23729,74153} = 0,447137218$$

Objem válce

$$V_1 = \pi r^2 h = \pi \cdot 19,85^2 \cdot 19,17 = 23729,74153 \text{ mm}^3$$

Objem jedné kuličky o průměru 6mm

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot 3^3 = 113,0973355 \text{ mm}^3$$

Celkový objem kuliček (116kusů)

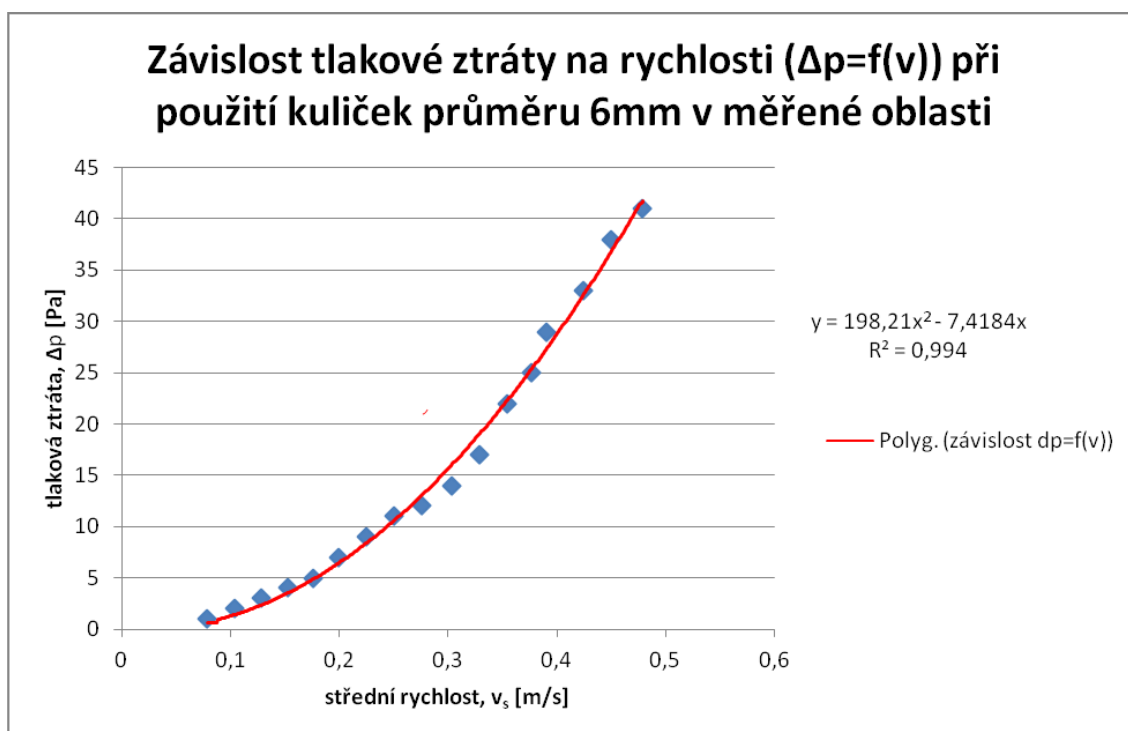
$$V_2 = 116 \cdot V = 116 \cdot 113,0973355 = 13119,29092 \text{ mm}^3$$

**Stanovení pórovitost ( $p$ ) uspořádaných kuliček ve válci**

$$p = \frac{d^3 - \frac{\pi d^3}{6}}{d^3} = \frac{0,006^3 - \frac{\pi \cdot 0,006^3}{6}}{0,006^3} = 0,476401224$$

## 6.8 Graf

Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti při použití kuliček o průměru 6mm v měřené oblasti (Obr. 6.4). Maximální tlaková ztráta při maximální střední rychlosti vzduchu přesahuje 40Pa. Graf je proložen kvadratickou funkcí.



Obr.6.4 Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti kuliček průměru 6mm

## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala určením odporu porézního prostředí. Cílem bylo experimentální stanovení permeability a pórovitosti porézního prostředí. Práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou.

V teoretické části byly nejdříve stanoveny základní vlastnosti a parametry porézního prostředí. K lepšímu porozumění termínu porézního prostředí byla podrobně popsána pórovitost, která je velmi úzce spjatá s porézním prostředím. Jelikož je několik typů, tvarů a rozměrů pórů, které se liší podle autora, vybral jsem jen pár z nich. Ze základních charakteristik jsem přešel na metody měření a přístroje pro měření pórovitosti. Základními typy měřidel jsou porozimetry, které jsou schopny dopodrobna analyzovat strukturu měřeného vzorku a jeho pórovitost.

Praktická část se zabývá návrhem experimentální měřicí vzduchové trati. V kapitole 3 je podrobný postup návrhu tratě a popis měření. Sestavení proběhlo ve školní laboratoři v místnosti E306. Byla využita měřicí trať pro měření třecích ztrát, kterou jsem představěl. Bylo zrealizováno osm různých variant měření, přičemž byly kombinovány tři prvky mezi sebou (jeden nebo dva ventilátory, dvojí provedení válce pro dva různé průměry kuliček, které byly nasypané do válce a představovaly tak porézní prostředí). Ve všech těchto případech byl využit snímač tlakové difference s vyhodnocovacím zařízením. Ventilátory měly stejné parametry a byly poháněné elektromotorem ovládaným frekvenčním měničem. Všechny prvky vyskytující se ve vzduchové trati byly vyspecifikovány v kapitole 4.

Z měření byla vyhodnocena tlaková ztráta ( $\Delta p$ ) porézního prostředí a velikost průtoku ( $Q_v$ ), které byly následně zaznamenávány do tabulky. Na základě těchto hodnot byla stanovena střední rychlost proudění vzduchu ( $v_s$ ) a Reynoldsovo číslo ( $Re$ ). Tlaková ztráta v závislosti na rychlosti proudění ( $\Delta p = f(v_s)$ ) byla vykreslena do grafů, a průběhy byly proloženy kvadratickou funkcí. Tato kvadratická funkce byla základem pro určení vnitřního odporového součinitele ( $C_2$ ) a permeability prostředí ( $\alpha$ ). Dále byla stanovena pórovitost porézního prostředí ( $p$ ) ze dvou různých přístupů ( $p$ ,  $p_m$ ). Hodnoty z obou přístupů byly následně porovnány. První variantou bylo měření pomocí jednoho ventilátoru v porézním prostředí vyplněného kuličkami o průměru  $3\text{mm}$  a  $6\text{mm}$ .

v měřené oblasti délky  $t_1=19,17\text{mm}$  a  $t_2=9\text{mm}$ . Ve variantě měřené oblasti délky  $t=19,17$  je z výsledků patrný rozsah tlakové difference  $\Delta p=(1\div 41)\text{Pa}$  pro kuličky průměru  $6\text{mm}$  a pro kuličky o průměru  $3\text{mm}$  je tento rozsah větší ( $\Delta p=(4\div 74)\text{Pa}$ ). Z výsledků měření je tedy patrné, že kuličky o průměru  $3\text{mm}$  kladou větší odpor, a tedy i vnitřní odporový součinitel je vyšší. Vnitřní odporový součinitel pro kuličky o průměru  $d=6\text{mm}$  je  $C_2=17283,06413\text{m}^2/\text{kg}$  a pro kuličky o průměru  $d=3\text{mm}$   $C_2=23470,4726\text{m}^2/\text{kg}$ . Permeabilita prostředí tvořená kuličkami o průměru  $d=6\text{mm}$  byla  $\alpha\approx 3,96\cdot 10^{-8}$  a pro kuličky o průměru  $d=3\text{mm}$   $\alpha\approx 1,09\cdot 10^{-8}$ . Z vyhodnocené permeability je patrné, že v případě porézního prostředí tvořeného kuličkami o průměru  $d=3\text{mm}$  je permeabilita nižší než u varianty porézního prostředí tvořeného kuličkami o průměru  $d=6\text{mm}$ . Z čehož plyne i vyšší tlaková ztráta porézního prostředí. U varianty měřené oblasti délky  $t=9\text{mm}$  je  $\Delta p=-72\text{Pa}$ ,  $C_2=31686,0535\text{m}^2/\text{kg}$  a  $\alpha\approx 9,22\text{E-}9$  pro  $d=6\text{mm}$  a  $\Delta p=1-99\text{Pa}$ ,  $C_2=48287,2471\text{m}^2/\text{kg}$  a  $\alpha\approx 5,34\text{E-}9$  pro  $d=3\text{mm}$ . Další variantou bylo měření se dvěma ventilátory, opět se stejnými průměry kuliček a délkami měřené oblasti. Všechny vyhodnocené veličiny jsou uvedené v příloze.

Byl vytvořen návod do cvičení pro měření odporu porézního prostředí v kap. 6. Návod obsahuje zadání měření, schéma měřící tratě, specifikaci prvků, postup měření, zpracování naměřených a vypočtených hodnot, tabulku a graf hodnot. Návod cvičení pro měření odporu porézního prostředí je určen pro studenty absolvující předmět mechanika tekutin.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY

- [1] KEMEL, M. *Hydrologie*. České vysoké učení technické, Praha, 1985.292s.
- [2] BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous media*. Israel: Dover Publications (September1, 1988), 1988. Stránky 12-15. ISBN-13: 978-0486656755
- [3] MEINZER, A., R. *Hydrology*. New York: Dover Publications, 1942. Stránky 18-20.
- [4] *ANSYS FLUENT User's Guide*. Canonsburg, 2010.
- [5] PEKSA, Mikuláš. *Studium transportních a separačních vlastností porézních materiálů*. Praha, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce RNDr. Jan Lang, Ph.D.
- [6] SCHNEIDER, Petr. *Textura porézních látek*. Praha, 2007. Učební text. Ústav chemických procesů AV ČR.
- [7] *Kategorizace pórů v porézních maticích*. Praha, 2007. Referát. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [8] VSCHT, lab\_porozimetrie.doc, vscht.cz. [Online]. [Cit. 2011-12-15]. Dostupné z WWW: <[www.vscht.cz/kat/download/lab\\_porozimetrie.doc](http://www.vscht.cz/kat/download/lab_porozimetrie.doc)>
- [9] Základní materiálové parametry porézních stavebních materiálů, tpm.fsv.cvut.cz, 2007, [online]. [cit. 2011-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/cviceni1.pdf>>
- [10] Lim laboratory imaging, lim.cz, [online]. [cit. 2011-11-12]. Dostupné z WWW: <[http://www.lim.cz/files/File/limaging/Leaflets/Lucia\\_Concrete\\_web\\_cze.pdf](http://www.lim.cz/files/File/limaging/Leaflets/Lucia_Concrete_web_cze.pdf)>
- [11] PROMINENT. *Prominent Systeme* [online]. 2007 [cit. 2011-11-14]. Dostupné z: [http://www.prominent-km.cz/fa\\_fischer/](http://www.prominent-km.cz/fa_fischer/)
- [12] PODRAZIL, Zdeněk. *Digitalizace textilních porézních struktur za účelem počítačové simulace transportních jevů*. Liberec, 2010. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Larisa Ocheretne.
- [13] Stanovení hustoty, uzavřená a skutečná pórovitost, stanovení nasákavosti vakuovou metodou [online] [cit. 2011-12-20]. Dostupné z WWW: <[http://waste.fce.vutbr.cz/userfiles/file/Keramika\\_labor/09navod.pdf](http://waste.fce.vutbr.cz/userfiles/file/Keramika_labor/09navod.pdf)>
- [14] Hydraulics resistance of porous iron, [online. New York, 1972 [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: <http://resources.metapress.com/pdf-preview.axd?code=w71676867w276h61&size=largest>
- [15] Lab X, labx.com, [online]. 1995 [cit. 2012-02-16]. Dostupné z: <http://photos.labx.com/labx/462000/462309-0.jpg>

- [16] KOZUBKOVÁ, M.; KOLEKTIV. *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní měření*. 1. Vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s.
- [17] Fine civil engineering software, fine.cz, [online]. 2007 [cit. 2012-02-16] Dostupné z WWW: <<http://www.fine.cz/geotechnicky-software/napoveda/mkp/koefficient-filtrace/>>
- [18] Odpor prostředí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Odpor\\_prost%C5%99ed%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Odpor_prost%C5%99ed%C3%AD)



## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D za odborné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce. Děkuji také Ing. Jaroslavu Krutilovi za pomoc při praktických měřeních v laboratoři.